



面向多波束测深数据的双向布料模拟自动滤波算法

杨安秀, 吴自银, 阳凡林, 宿殿鹏, 冯成凯, 许方正

引用本文:

杨安秀, 吴自银, 阳凡林, 宿殿鹏, 冯成凯, 许方正. 面向多波束测深数据的双向布料模拟自动滤波算法[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2022, 47(4): 517–525.

YANG Anxiu,WU Ziyin,YANG Fanlin,SU Dianpeng,FENG Chengkai,XU Fangzheng. [An Automatic Filtering Algorithm of Multi-beam Bathymetry Based on Bidirectional Cloth Simulation](#)[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(4): 517–525.

相似文章推荐（请使用火狐或IE浏览器查看文章）

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

机载海洋激光测深系统的自适应匹配滤波算法

Adaptive Matched Filtering Algorithm for High-Precision Laser Bathymetry

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(9): 1395–1403 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200402>

一种基于常梯度模板插值的声线跟踪算法

A Sound Ray Tracking Algorithm Based on Template-Interpolation of Constant-Gradient Sound Velocity

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(1): 71–78 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180405>

基于渐消因子的改进Kalman滤波时间尺度估计算法

An Improved Kalman Filter Time Scale Algorithm Based on Forgetting Factor

武汉大学学报 · 信息科学版. 2019, 44(8): 1205–1211,1219 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180065>

顾及系统噪声和观测噪声的分级自适应信息滤波算法

Hierarchical Adaptive Information Filtering Algorithm Considering System Noise and Observation Noise

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(1): 88–95 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190248>

一种改进的GPS区域叠加滤波算法

An Improved Stacking Filtering Algorithm for GPS Network

武汉大学学报 · 信息科学版. 2019, 44(8): 1220–1225 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180049>

DOI:10.13203/j.whugis20190419



文章编号:1671-8860(2022)04-0517-09

面向多波束测深数据的双向布料模拟自动滤波算法

杨安秀^{1,2,3} 吴自银³ 阳凡林^{1,2} 宿殿鹏^{1,2} 冯成凯¹ 许方正¹

1 山东科技大学测绘与空间信息学院,山东 青岛,266590

2 自然资源部海洋测绘重点实验室,山东 青岛,266590

3 自然资源部第二海洋研究所海底科学重点实验室,浙江 杭州,310012

摘要:针对现有多波束测深数据的滤波算法需要人工干预且难以实现自动滤波的问题,在布料模拟滤波基础上,提出了一种基于双向布料模拟(bidirectional cloth simulation filtering, BCSF)的多波束测深数据滤波算法。首先,基于二次曲面(Levenberg-Marquardt)算法拟合构建传递式迭代趋势面,消除海底负异常数据;然后,构建BCSF修正模型,确定最终海底滤波面,解决海底凹凸地形或具有成簇噪点的复杂海域地形容易产生的过度滤波问题;最后,对分类海底点与非海底点的距离阈值进行了自适应优化与估计,进一步提高BCSF滤波结果的准确性。将所提算法应用于实测多波束测深数据,实验结果表明,与布料模拟滤波相比,所提算法不仅克服了过度滤波的缺陷,而且实验区域的整体测试数据的噪点剔除率从12.87%下降到0.76%,局部测试数据的噪点剔除率从15.29%下降到1.09%;与基于不确定度理论的多波束测深滤波相比,所提算法更加简洁,易于技术实现,人工干预很少,保留了更多的地形细节,具有较好的鲁棒性和应用前景。

关键词:多波束测深;双向布料模拟滤波;传递式迭代趋势面;自适应距离阈值;多波束测深滤波

中图分类号:P229

文献标志码:A

多波束测深技术是近20年来海洋测深的主要技术手段^[1-4],在中国海域得到广泛的应用,也促进了高分辨率海底地貌学研究的蓬勃发展^[5-10]。但在测量过程中,由于仪器自噪声、海况因素、设备参数设置不合理及海中生物的影响,导致多波束测深数据存在较多噪点,严重影响了海底地形的真实性表达^[11]。海底地形是了解地球外部形状、海底构造运动、海底演化的直接依据,也是海洋经济开发、海洋科学研究和海洋军事应用等方面的重要基础数据^[12-13]。为获取真实的海底地形,在使用前必须对多波束测深数据进行滤波处理^[14]。目前,常用的多波束自动滤波算法主要有COP(combined offline processing)法^[15]、Ware法^[16]、Du法^[17]、Eeg法^[18]、趋势面法^[19]、中值/均值滤波法^[20]、抗差估计法^[21]、Bayes估计法^[22]、中值滤波/局部方差检测和小波分析相结合滤波法^[23]、最小二乘支持向量机滤波

法^[24]、选权迭代加权平均法^[25]等。以上算法大多基于数理统计理论进行测深数据的粗差探测与剔除,部分算法存在对海量测深数据适用性差、对复杂海域滤波性能欠佳等不足。而当前主流的基于不确定度理论的多波束测深数据滤波(combined uncertainty bathymetry estimation, CUBE)算法具有效率高、稳健性好等特点而被广泛采用^[26-28],该算法利用测量所得的水深点信息,根据网格节点选取周围的水深数据,再利用Kalman滤波对节点的水深进行估计^[29]。CUBE算法滤波效果建立在合理的船配置及各项改正精度的基础上,在构建CUBE曲面的过程中需要反复调整相关参数,对于复杂的海底地形,滤波效果可能会受到影响^[30],且该算法过于复杂,迄今尚未实现国产化。

布料模拟是一种物理建模的过程,最早的布料模拟是由文献[31]提出的在任意多个约束点支撑下三维悬挂式的布料模拟建模方法,该模型

收稿日期:2020-07-12

项目资助:国家自然科学基金(52001189,41830540,41930535);自然资源部海底科学重点实验室开放基金(KLSG2106);山东科技大学科研创新团队支持计划(2019TDJH103);自然资源部第二海洋研究所科研基金(JZ1902);“全球变化与海气相互作用”专项(GASI-EOGE-01)。

第一作者:杨安秀,博士,主要从事海底地形地貌测量研究。skyanganxiu@163.com

通讯作者:吴自银,博士,研究员。zywu@vip.163.com

合成的布料具有褶皱和更逼真的外观。目前,布料模拟技术广泛应用于计算机动画、虚拟现实、物理仿真、建模软件以及其他相关领域。基于布料模拟技术^[32],文献[33]提出了基于布料模拟的陆地激光点云滤波(cloth simulation filtering, CSF)方法,其优点是参数设置少、精度高,可适用于不同复杂程度的陆地地形,为机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)点云滤波提供了新的解决方案。由于多波束数据在采集过程中海底回波会出现二次反射等情况,实测海底地形不可避免地会出现深于真实海底地形的负异常点,将该算法直接应用于多波束测深数据会出现以下3个问题:(1)负异常点被错误保留下;(2)负异常点引起的过度滤波问题;(3)海底复杂凹凸地形产生的过度滤波问题。由此可见,直接将CSF算法应用于多波束测深数据的滤波效果并不理想,尤其对于较明显的海底凹地形(如冲槽、冲沟、麻坑等)和海底凸地形(如断崖、海底火山、泥火山、礁石等)会产生严重的过度滤波。

因此,本文在已有算法基础上进一步提出一种双向布料模拟滤波(bidirectional cloth simulation filtering, BCSF)算法来解决多波束测深数据的过度滤波问题。首先,基于二次曲面Levenberg-Marquardt(LM)算法拟合构建传递式迭代趋势面,既可以消除海底负异常数据,同时又表达了海底地形的连续性;然后,为进一步提高滤波结果的准确性,对分类海底点与非海底点的距离阈值进行自适应优化与估计;最后,构建BCSF修正模型,确定基于BCSF修正模型的滤波曲面,解决海底凹凸地形的过度滤波问题,并将该算法

应用于实测多波束测深数据。

1 双向布料模拟滤波算法

1.1 BCSF 修正模型

为解决现有方法在海底凹凸地形的过度滤波问题,本文提出了一种BCSF修正模型,如图1所示。图1(a)为原始多波束点云及初始化模拟布料,点云为离散分布,初始化节点为规则分布,初始化的模拟布料位于点云的正上方。对于海底凹凸地形,当采用正向布料模拟滤波时(即倒置海底点云),图1(c)中的海底凸地形(黑色虚线框)变为凹地形,布料节点在下落过程中受重力及节点内部之间的牵拉力作用而不断进行位置调整,当地形模拟迭代过程结束时,凹地形处的节点与相对应海底点的高程差 ΔH 大于自适应距离阈值 H 而被错误判断为非海底点并删除,凹地形周围坡面处的节点被有效保留下。而对于图1(d)中的海底凹地形(红色虚线框)结果却相反,倒置后的凸地形被保留,凸地形周围坡面处的节点被删除。

由图1可知,对于明显的凹凸海底地形,仅采用正向滤波难免会造成过度滤波现象。当海底点进行反向布料模拟滤波时(即无需倒置海底点云),由于布料节点的受力作用,在凹凸地形及其周围坡面区域,反向滤波结果与正向滤波结果恰好形成了过度滤波区域的空洞互补。因此,双向布料模拟滤波可以结合两者的优势,将互补区域的数据进行融合,可有效保留完整的海底凹凸地形,BCSF修正模型结果如图1(b)所示,与实际海底地形的吻合度较高。

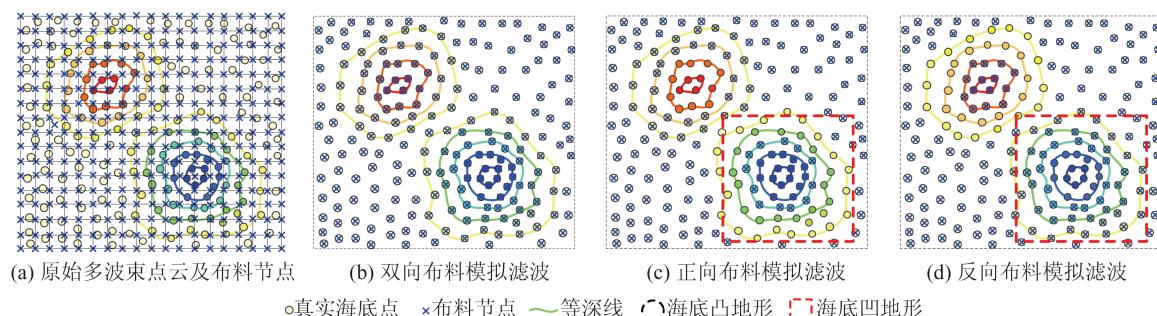


图1 BCSF修正模型

Fig.1 BCSF Correction Model Schematic

模拟的布料是一系列有质量的点相互连接而成的格网,其实质是建模的过程。双向布料模拟的节点位置和作用力满足:

$$m \frac{\partial^2 x(t)}{\partial t^2} = mg + \sum_{(l,n \in E)} c_e (\|Z_{ln}\|_t - \|Z_{ln}\|) \frac{Z_{ln}}{\|Z_{ln}\|_t} \quad (1)$$

式中, m 表示节点 Z_l 的质量; $x(t)$ 表示 Z_l 在 t 时刻

的位置; g 表示重力加速度; c_e 表示节点弹簧的弹性变形系数; E 表示 Z_l 的邻域集合; $\|Z_{ln}\|_t$ 和 $\|Z_{ln}\|$ 分别表示 Z_l 与 Z_n 在 t 时刻的距离和原始距离; $Z_{ln}/\|Z_{ln}\|_t$ 表示 Z_l 指向 Z_n 的单位向量。

$$\begin{cases} C(t+dt) = C(t) + C'(t)dt + (C''(t) + \Delta C''(t))dt^2/2 \\ C'(t+dt) = C'(t) + (C''(t) + \Delta C''(t))dt \\ C(t+2dt) = C(t+dt) + C'(t+dt)dt + (C''(t+dt) + \Delta C''(t+dt))dt^2/2 \\ C'(t+2dt) = C'(t+dt) + (C''(t+dt) + \Delta C''(t+dt))dt \end{cases} \quad (2)$$

式中, dt 为时间步长; $C(t)$ 、 $C(t+dt)$ 和 $C(t+2dt)$ 分别是碰撞在 t 、 $t+dt$ 和 $t+2dt$ 时刻的位置; $C'(t)$ 、 $C'(t+dt)$ 和 $C'(t+2dt)$ 分别是碰撞在 t 、 $t+dt$ 和 $t+2dt$ 时刻的运动速度; $C''(t)$ 和 $C''(t+dt)$ 分别是碰撞在 t 和 $t+dt$ 时刻的运动加速度; $\Delta C''(t)$ 和 $\Delta C''(t+dt)$ 分别是碰撞在 t 和 $t+dt$ 时刻的修正加速度。

当地形模拟的迭代次数大于最大迭代次数 M 时, 正向布料模拟和反向布料模拟过程结束, 并对所有布料节点进行碰撞点检测。计算布料节点与其相对应海底点的高程差 ΔH , 并判断 ΔH 与自适应距离阈值 H 的大小关系, 若 $\Delta H < H$, 则该节点被保留为海底点, 移至对应海底点位置,

$$\begin{cases} F_F(P_T, H) = \left\{ P_F(x_F, y_F, z_F) \mid z_F = f_F(x_F, y_F) \mid P_T(x_T, y_T, z_T) \in T \right\} \\ F_I(P_T, H) = \left\{ P_I(x_I, y_I, z_I) \mid z_I = f_I(x_I, y_I) \mid P_T(x_T, y_T, z_T) \in T \right\} \end{cases} \quad (4)$$

由于正向滤波面和反向滤波面的某些节点会被移动至相同的海底测深点位置, 因此最终海底滤波面 $F(P_T, H)$ 可以表示为正向滤波面 $F_F(P_T, H)$ 和反向滤波面 $F_I(P_T, H)$ 的并集, 表示如下:

$$F(P_T, H) = F_F(P_T, H) \cup F_I(P_T, H) \quad (5)$$

$F(P_T, H)$ 融合了两个滤波面相同位置的海底测深点, 地形处海底测深点和其他海底测深点互补(当正向滤波面和反向滤波面的对应海底点位置不一致时, 保留正向滤波面的海底点)。

1.2 传递式迭代趋势面构建

由于海洋动力会侵蚀海底不规则部分, 因此海底自然地形是连续变化的, 尽管有坡度, 但是不会突兀出现。由于海底回波会出现二次反射等情况, 实测海底地形不可避免地会出现深于真实海底地形的负异常点, 因此需要建立传递式迭代趋势面, 如图 2 所示, 步骤如下:

1) 由于原始多波束测深数据为离散点云, 首

在布料节点的下降过程中, 有必要对每一个迭代过程结束时的节点进行碰撞点检测, 以此确定布料节点的最终位置。碰撞约束是由布料节点的位置和速度约束决定的, 在两个时间步长内有:

否则被判断为非海底点并删除。因此, 被保留的节点 $Z_T = f(x_T, y_T)$ 与相对应海底点 $P_T(x_T, y_T, z_T)$ 应满足:

$$\begin{cases} z_F = f_F(x_F, y_F) = f(x_T, y_T) \\ z_I = f_I(x_I, y_I) = f(x_T, y_T) \end{cases} \quad (3)$$

式中, (x_F, y_F, z_F) 和 (x_I, y_I, z_I) 分别是节点 P_F 和 P_I 的地理坐标。

定义正向滤波面为正向滤波后形成的模拟布料, 反向滤波面为反向滤波后形成的模拟布料。假设正向滤波面为 $F_F(P_T, H)$, 其上的布料节点表示为 $P_F(x_F, y_F, z_F)$; 反向滤波面为 $F_I(P_T, H)$, 其上的布料节点表示为 $P_I(x_I, y_I, z_I)$ 。 T 表示海底地形, 则正向滤波面和反向滤波面可以表达为:

$$Q^2 = \min \sum_{j=1}^k [z_j - (ax_j^2 + by_j^2 + cx_jy_j + dx_j + ey_j + f)]^2 \quad (6)$$

式中, (x_j, y_j, z_j) 为水深点集 N_j ($j=1, 2 \dots k$) 在局部坐标系中的地理坐标; 多项式拟合参数 a, b, c, d, e, f 可以由最小二乘 LM 算法获得。

2) 以 P_1 为中心点, 以 r 为半径, 搜寻区域内所有水深点并进行二次曲面 LM 拟合。计算曲面内水深点的平均水深值及标准差 σ_H , 找出水深值与平均水深值之差大于 $2\sigma_H$ 的水深点, 将其存入可疑点集并删除, 确保离散点集 N_1 中不含有粗差(见图 2(a))。 σ_H 的计算如下:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k (H_j - \bar{H}_j)^2}{k-1}} \quad (7)$$

式中, H_j 为海底点水深值; \bar{H}_j 为局部拟合平面内海

底点水深均值; k 为局部拟合范围内海底点个数。

3) 寻找与点 P_1 最近的点, 记为点 P_2 , 由于 $N_1 \cap N_2$ 的点集中不再含有粗差, 由 N_2 拟合的二次曲面精度更高, 找出 $(N_2 - N_1 \cap N_2)$ (图 2(b) 斜线阴影部分) 点集中水深值与平均水深值之差大于 $2\sigma_H$ 的水深点, 将其存入可疑点集并删除, 确保离

散点集 N_2 中不含有粗差。

4) 寻找与点 P_2 最近的点(不包含已完成过的点), 记为点 P_3 (如图 2(c)), 重复步骤 3), 直到遍历完所有的水深点, 无水深点存入可疑点集, 此时所拟合的地形趋势面达到稳定状态, 得到最终的海底地形趋势面(图 2(d))。

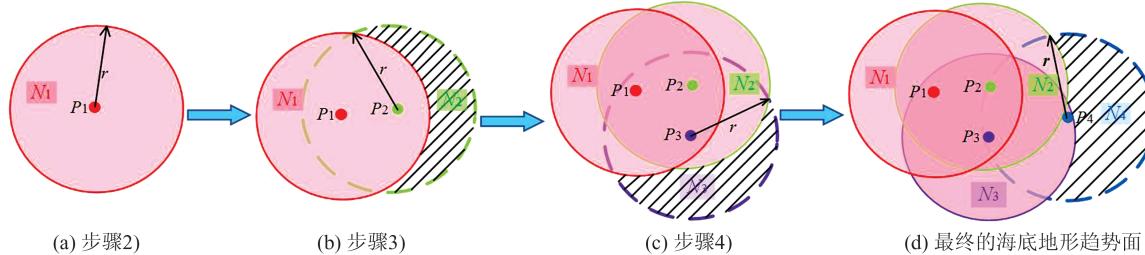


图 2 构建传递式迭代趋势面

Fig. 2 Schematic Diagram of the Transfer Iteration Trend Surface

由图 2 可知, 实际选取的局部拟合范围内会包含几十个离散点, 因此在迭代过程中不会出现由于点数不够而导致拟合过程终止的情况。传递式迭代趋势面拟合精度较高, 每个曲面在拟合前, 与周围已经完成拟合的重叠区域不再含有粗差, 从而保证了整个趋势面的拟合精度。

1.3 自适应距离阈值选取

海底点云滤波时, 距离阈值的选取是决定滤波质量的关键因素。由于浅海区域海底会生长有海藻类等低矮水生植物, 如果固定距离阈值过大, 可能会将水生植物错误纳入海底点范围, 影响海底地形的准确性; 如果固定距离阈值过小, 会削平海底细节特征, 无法保留海底微地貌, 影响海底地貌的完整性。因此, 有必要设置一种自适应距离阈值, 充分结合海底地貌特征, 合理筛选海底点与非海底点, 避免造成过度滤波或不完全滤波, 自适应距离阈值 H 计算如下:

$$H = \frac{\sum_{j=1}^k \sigma_j}{k} \quad (8)$$

其中,

$$\sigma_p^2 = \frac{\sum_{j=1}^k H_j^2 W_{jp}}{\sum_{j=1}^k W_{jp}} - \left(\frac{\sum_{j=1}^k H_j W_{jp}}{\sum_{j=1}^k W_{jp}} \right)^2 \quad (9)$$

W_{jp} 为权分布函数, 可以表达为:

$$W_{jp} = \begin{cases} 1 - \frac{d_{jp}}{r}, & d_{jp} < r \\ 0, & d_{jp} \geq r \end{cases} \quad (10)$$

式中, r 是搜索半径; d_{jp} 是目标海底点 p 与其邻域内样本海底点 j 之间的距离。

1.4 BCSF 算法流程

图 3 展示了 BCSF 算法的流程, 主要步骤如下:(1) 基于二次曲面 LM 算法构建传递式迭代趋势面, 剔除负异常数据, 表达海底地形连续性;(2) 设置滤波参数: 格网分辨率 G 、最大迭代次数 M 、刚度参数 R , 选取优化的自适应距离阈值 H ;(3) 分别正向和反向初始化布料格网, 将布料节点与海底点投影至同一水平面内, 确定布料节点与其对应的海底点, 并记录两者的高程值;(4) 计算作用力下布料节点的高程值, 比较节点与对应海底点高程值, 如果节点高程值小于或等于海底点高程值, 移动该节点至相对应海底点位置, 并将其标记为海底点;(5) 重复步骤(4), 当所有节点的迭代次数大于设定的 M 时, 地形模拟过程结束;(6) 计算布料节点与其对应海底点高程差, 若高程差小于或等于自适应距离阈值 H , 则被分类为海底点, 否则为非海底点;(7) 构建 BCSF 修正模型, 解决海底凹凸地形的过度滤波问题, 确定最终海底滤波面。

2 实验与分析

2.1 研究数据

实验中采用实测多波束测深数据验证 BCSF 算法的有效性, 该数据利用 R2 Sonic2024 多波束测量仪器采集, 表 1 为 R2 Sonic2024 测深系统主要技术参数指标^[34-35]。本文实验测区如图 4 所示, 水深为 13.4~83.5 m, 数据共包含 456 168 个水深点, 水深点密度约为 5.92 点/m², 实验数据分为整体实验数据和局部实验数据(图 4 中红色框标记)。

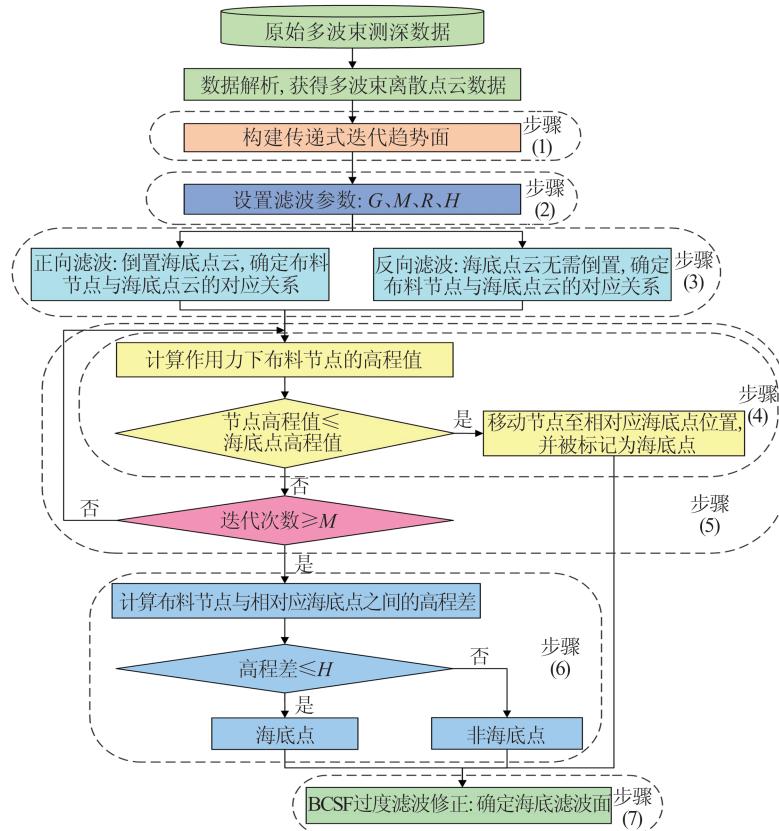


图3 BCSF 算法流程图

Fig.3 Flowchart of BCSF Algorithm

表1 R2 Sonic2024 测深系统主要技术参数指标

Tab. 1 Technical Parameters of R2 Sonic2024

参数	指标
工作频率/kHz	200~400
带宽/kHz	60
波束大小	$0.5^\circ \times 1^\circ$
覆盖宽度	$10^\circ \sim 160^\circ$
最大量程/m	500
最大发射率/Hz	60
量程分辨率/cm	1.25
波束数目/个	256
位置偏移误差/mm	5
声速剖面测量误差/(m·s ⁻¹)	0.5

2.2 传递式迭代趋势面构建

本文选择搜索半径 r 为 2 m, 采用 MATLAB R2013a 软件编程实现传递式迭代趋势面的构建, 其中整体实验区域共修改了 7 298 个多波束水深点点位, 局部实验区域共修改 475 个多波束水深点点位。图 5(a) 为 100 m × 100 m 的多波束海底点云原始数据, 海底的负异常点在三维图上表现为类似立柱的形状, 大部分是孤立的不连续点; 浅水海域常常长有贴近海底面的水生植被、浮游生物等, 与海底点云融为一体,

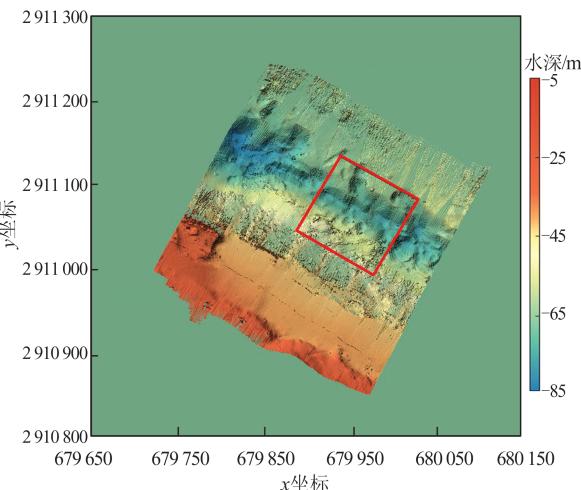


图4 研究区域

Fig. 4 Study Area

体, 较难滤除; 图 5(b) 为构建传递式迭代趋势面后的海底三维图。对比图 5(a)、5(b) 可以看出, 构建传递式迭代趋势面后的海底面不再含有负异常点, 同时也滤除了水体中的噪点, 海底面更加光滑、连续, 但是生长于海底的水生植被、浮游生物等在进行局部海底曲面 LM 拟合时, 其与海底较为贴近而没有完全滤除, 如图 5(b) 中的黑色框选部分。

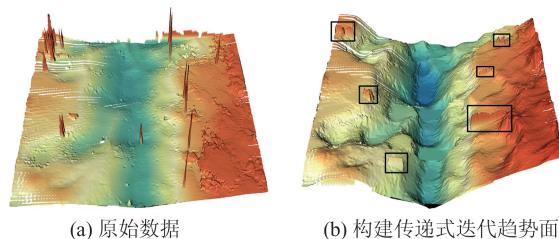


图5 传递式迭代趋势面构建
Fig. 5 Establishment of Transfer Iterative Trend Surface

2.3 BCSF修正模型结果与分析

BCSF修正模型可以解决海底凹凸地形的过度滤波问题及海底植被等的错误分类问题。图6(a)为原始的多波束测深海底表面,将海底点云倒置,模拟一块柔软的布料放置于倒置海底点云的正上方,设定格网分辨率 G ,确定布料节点的数量,将布料节点与海底点投影至同一水平面内,格网化海底点,确定布料节点与其对应的海底点,并使模拟布料做自由落体运动,得到正向滤波结果和反向滤波结果分别如图6(c)和图6(d)所示。

由图6可知,在正向滤波结果中,由于布料节点在运动过程中所受外力及节点之间的牵拉力作用,当布料模拟结束后,布料节点与相对应的海底点之间的高差大于所设置的距离阈值,判断这部分节点为非海底点从而被删除,使得海底的部分凹凸地形产生了较为严重的过度滤波现象,部分海底地形丢失,例如图6(c)中的绿色框选部分。然而,正向滤波结果中的过度滤波区域在反向滤波结果(图6(d)红色框选)中是完整区域,两者可以形成优势互补,得到双向布料模拟滤波结果。对比图6(a)与6(b)可知,双向布料模拟滤波既能够有效滤除非海底点,又可以保留完整的海底凹凸地形,滤波效果较为理想。

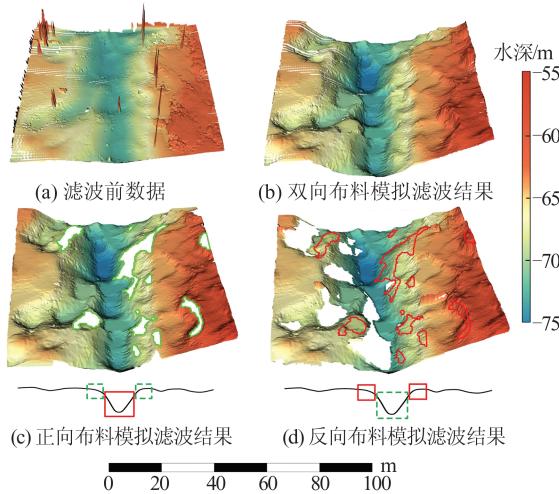


图6 双向布料模拟滤波结果
Fig. 6 Results of BCSF Method

2.4 滤波结果与分析

为验证BCSF算法的有效性,分别采用BCSF算法、CSF算法和当前应用较广泛的CUBE算法对实测多波束测深数据进行滤波对比实验。BCSF算法中需要设置的自定义参数包括布料格网分辨率 G 、最大迭代次数 M 、刚度参数 R 及自适应距离阈值 H 。在实测算例测试中,选择 $G=0.5\text{ m}$ 、 $M=200$ 、 $R=1$ 、 H 依据§1.3获得。图7为采用3种滤波算法得出的结果,通过比对分析可知:(1)3种滤波算法在不同程度上均可以对原始多波束测深数据进行非海底点滤除,但是由BCSF算法形成的滤波面与真实海底地形之间的吻合度最高,滤波效果最好。(2)CSF算法用于多波束测深数据滤波时,由于原始多波束测深数据中含有负异常点及特征明显的凹凸地形,产生了一定程度的过度滤波,部分海底地形数据丢失,而BCSF算法通过构建传递式迭代趋势面及BCSF修正模型,不仅剔除了负异常数据,而且解决了过度滤波问题,突显了海底滤波优势。(3)对于含有成簇噪点的复杂海底地形(图7(e)中A与 A' 、B与 B'),CUBE算法出现滤波不彻底现象,少量水深值较小的噪点被错误保留。相比之下,BCSF算法对于复杂海底处出现的多个成簇噪点滤波效果较好,能够反映各种复杂程度的真实海底地形。因此,对于多波束测深数据,BCSF算法能够更好地表达海底微小地形特征,对各种复杂的真实海底地形均具有较好的适用性和鲁棒性。

为进一步定量分析BCSF算法性能,将整体实验区域和局部实验区域分别采用BCSF算法、CSF算法和CUBE算法进行滤波,滤波前后的各项统计指标如表2所示。其中,海底噪点剔除率(elimination rate, ER)是指剔除的噪点数占原始测深数据的百分率,即 $ER = N_n/N_0 \times 100\%$, N_n 为剔除的噪点数, N_0 为原始测深数据。

对比表2中采用CSF算法和BCSF算法得到的ER可以看出,整体实验区域从12.87%下降到0.76%,局部实验区域从15.29%下降到1.09%,BCSF算法避免了过度滤波问题。且BCSF算法在3种滤波算法中的ER和标准差都是最小的,说明BCSF算法在有效滤除非海底点的前提下,充分保证了多波束测深数据的完整性,滤波后的海底点更加符合海底地形的分布规律,显著提高了海底地形的表达精度。

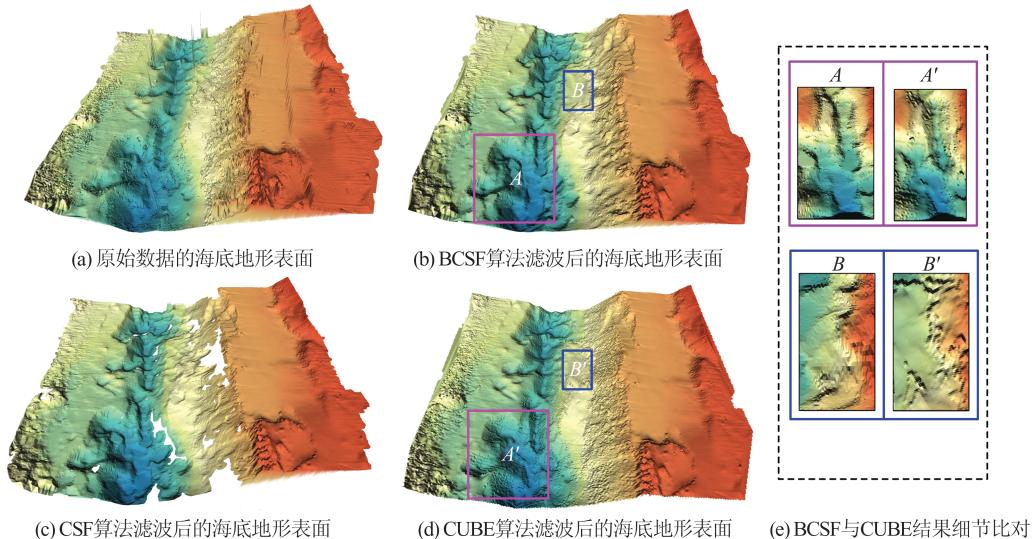


图 7 3 种滤波算法结果比对

Fig. 7 Comparison of the Results Between Three Filtering Algorithms

表 2 3 种滤波算法性能比对

Tab. 2 Performance Comparison Between Three Filtering Algorithms

数据	滤波 算法	最小水深/m	最大水深/m	平均水深/m	标准差/m	海底点云	ER/%
整体数据	原始数据	13.40	83.52	37.68	16.83	456 168	
	BCSF	14.98	81.51	37.91	16.47	452 696	0.76
	CSF	15.03	81.26	36.97	16.76	397 438	12.87
	CUBE	15.12	81.50	40.45	17.23	446 224	2.18
局部数据	原始数据	13.69	81.34	65.42	4.93	27 763	
	BCSF	53.53	74.92	65.57	4.49	27 459	1.09
	CSF	53.20	74.86	65.48	4.79	23 519	15.29
	CUBE	52.53	74.88	65.61	4.54	27 061	2.53

3 结语

本文采用二次曲面 LM 算法构建了传递式迭代趋势面,既消除了海底负异常数据,又表达了海底地形的连续性,同时保证了测深数据的完整性;针对海底的凹凸地形或具有成簇噪声点等复杂海域地形,提出了 BCSF 修正模型来解决复杂海域的过度滤波问题;同时,自适应距离阈值的改进也在一定程度上避免了过度滤波的产生。因此,BCSF 算法涵盖了趋势面构建、滤波模型和自适应阈值确定等完整的滤波过程。

通过浅水多波束测深数据的实验结果发现,BCSF 算法在有效滤除噪声点的前提下,还克服了已有算法不可避免产生的过度滤波问题,能够充分表达海底微地形地貌特征,保留更多真实的海底微地形地貌细节,体现出 BCSF 算法在多波束测深数据的自动滤波处理方面具有较好的鲁棒性和应用前景。

参 考 文 献

- [1] Li Jiabiao. Multibeam Sounding Principles, Survey Technologies and Data Processing Methods [M]. Beijing: Ocean Press, 1999 (李家彪. 多波束勘测原理、技术和方法[M]. 北京: 海洋出版社, 1999)
- [2] Zhao Jianhu. Modern Marine Surveying and Charting [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008 (赵建虎. 现代海洋测绘 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008)
- [3] Liu Y, Wu Z Y, Zhao D N, et al. Construction of High-Resolution Bathymetric Dataset for the Mariana Trench[J]. IEEE Access, 2019, 7: 14241–14250
- [4] Yin S R, Lin L, Pope E L, et al. Continental Slope-Confining Canyons in the Pearl River Mouth Basin in the South China Sea Dominated by Erosion, 2004–2018[J]. Geomorphology, 2019, 344: 60–74
- [5] Zhou J Q, Wu Z Y, Jin X L, et al. Observations and Analysis of Giant Sand Wave Fields on the Tai-

- wan Banks, Northern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2018, 406: 132–141
- [6] Wu Z Y, Jin X L, Cao Z Y, et al. Distribution, Formation and Evolution of Sand Ridges on the East China Sea Shelf [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2010, 53(1): 101–112
- [7] Wu Ziyin, Li Jiabiao, Yang Fanlin, et al. An Integrated Method for Automatic Identification of the Foot Point of Slope [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(2): 170–177 (吴自银, 李家彪, 阳凡林, 等. 一种大陆坡脚点自动识别与综合判断方法 [J]. 测绘学报, 2014, 43(2): 170–177)
- [8] Wang M W, Wu Z Y, Yang F L, et al. Multifeature Extraction and Seafloor Classification Combining LiDAR and MBES Data Around Yuanzhi Island in the South China Sea[J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3828
- [9] Wu Z Y, Li J B, Jin X L, et al. Distribution, Features, and Influence Factors of the Submarine Topographic Boundaries of the Okinawa Trough [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(8): 1885–1896
- [10] Wu Z Y, Jin X L, Zhou J Q, et al. Comparison of Buried Sand Ridges and Regressive Sand Ridges on the Outer Shelf of the East China Sea[J]. *Marine Geophysical Research*, 2017, 38(1): 187–198
- [11] Yang Fanlin, Li Jiabiao, Wu Ziyin, et al. The Methods of Removing Instantaneous Attitude Errors for Multibeam Bathymetry Data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(5): 450–456 (阳凡林, 李家彪, 吴自银, 等. 多波束测深瞬时姿态误差的改正方法 [J]. 测绘学报, 2009, 38(5): 450–456)
- [12] Wu Ziyin, Yang Fanlin, Luo Xiaowen, et al. High-Resolution Submarine Topography—Theory and Technology for Surveying and Post-Processing [M]. Beijing: China Science Press, 2018 (吴自银, 阳凡林, 罗孝文, 等. 高分辨率海底地形地貌——探测处理理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2018)
- [13] Wu Ziyin, Yang Fanlin, Li Shoujun, et al. High-Resolution Submarine Topography—Visual Computation and Scientific Applications [M]. Beijing: China Science Press, 2018 (吴自银, 阳凡林, 李守军, 等. 高分辨率海底地形地貌——可视计算与科学应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2018)
- [14] Zhao Xianghong, Bao Jingyang, Ouyang Yongzhong, et al. Detecting Outlier of Multibeam Sounding with BP Neural Network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(4): 518–524 (赵祥鸿, 暴景阳, 欧阳永忠, 等. 利用BP神经网络剔除多波束测深数据粗差 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(4): 518–524)
- [15] Guenther G C, Green J E. Improved Depth Selection in the Bathymetric Swath Survey System (BS3) Combined Offline Processing (COP) Algorithm [R]. National Oceanic and Atmospheric Administration, Technical Report OTES-10, Department of Commerce, Rockville, MD, 1982
- [16] Ware C, Slipp L, Wong K W, et al. A System for Cleaning High Volume Bathymetry[J]. *International Hydrographic Review*, 1992, 69: 77–94
- [17] Du Z, Wells D E, Mayer L A. An Approach to Automatic Detection of Outliers in Multibeam Echo Sounding Data [J]. *Hydrographic Journal*, 1996, 79: 19–25
- [18] Eeg J. On the Identification of Spikes in Soundings [J]. *International Hydrographic Review*, 2015, 72(1): 33–41
- [19] Ladner R W, Elmore P, Perkins A L, et al. Automated Cleaning and Uncertainty Attribution of Archival Bathymetry Based on a Priori Knowledge [J]. *Marine Geophysical Research*, 2017, 38(3): 291–301
- [20] Mann M, Agathoklis P, Antoniou A. Automatic Outlier Detection in Multibeam Data Using Median Filtering [C]// IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, Victoria, BC, Canada, 2001
- [21] Wang Leyang, Chen Hanqing. Multi-beam Bathymetry Data Processing Using Iterative Algorithm of Robust Least Squares Collocation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(5): 658–665 (王乐洋, 陈汉清. 多波束测深数据处理的抗差最小二乘配置迭代解法 [J]. 测绘学报, 2017, 46(5): 658–665)
- [22] Huang Xianyuan, Sui Lifen, Zhai Guojun, et al. Outliers Detection of Multi-Beam Data Based on Bayes Estimation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(2): 168–171 (黄贤源, 隋立芬, 翟国君, 等. 利用Bayes估计进行多波束测深异常数据探测 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(2): 168–171)
- [23] Yang Fanlin, Liu Jingnan, Zhao Jianhu. Detecting Outliers and Filtering Noises in Multi-beam Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(1): 80–83 (阳凡林, 刘经南, 赵建虎. 多波束测深数据的异常检测和滤波

- [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(1): 80–83)
- [24] Huang Xianyuan, Zhai Guojun, Sui Lifen, et al. Application of Least Square Support Vector Machine to Detecting Outliers of Multi-beam Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(10): 1188–1191 (黄贤源, 翟国君, 隋立芬, 等. 最小二乘支持向量机在海洋测深异常值探测中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(10): 1188–1191)
- [25] Lecours V, Dolan M F J, Micallef A, et al. A Review of Marine Geomorphometry, the Quantitative Study of the Seafloor [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(8): 3207–3244
- [26] Calder B R, Mayer L A. Automatic Processing of High-Rate, High-Density Multibeam Echosounder Data [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(6): 1048
- [27] Vasquez M E. Tuning the CARIS Implementation of CUBE for Patagonian Waters [D]. Fredericton: University of New Brunswick, 2007
- [28] Park Y, Jung N D, Kim J S, et al. Performance Validation of Surface Filter Based on CUBE Algorithm for Eliminating Outlier in MultiBeam Echo Sounding [J/OL]. https://www.hydrographicsociety.org/documents/hydrographicsociety.org/downloads/ifhs_news_no_1_yosup_park_et_al.pdf, 2013
- [29] Huang Motao, Zhai Guojun, Chai Hongzhou, et al. Analysis on the Mathematical Models of CUBE Algorithm for the Detection of Abnormal Data in Multi-beam Echosounding [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2011, 31(4): 1–4 (黄漠涛, 翟国君, 柴洪洲, 等. 检测多波束测深异常数据的CUBE算法模型解析[J]. 海洋测绘, 2011, 31(4): 1–4)
- [30] Zhao Dineng, Wu Ziyin, Li Jiabiao, et al. The Key Technology and Application of Parameter Optimization Combined CUBE and Surface Filter [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(2): 245–255 (赵荻能, 吴自银, 李家彪, 等. CUBE曲面滤波参数联合优选关键技术及应用[J]. 测绘学报, 2019, 48(2): 245–255)
- [31] Weil J. The Synthesis of Cloth Objects [J]. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1986, 20 (4) : 49–54
- [32] Long J, Burns K, Yang J. Cloth Modeling and Simulation: A Literature Survey [J]. *Digital Human Modeling*, 2011, DOI: 10.1007/978-3-642-21799-9_35
- [33] Zhang W M, Qi J B, Wan P, et al. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8 (6): 501
- [34] Guo Jun, Liu Shengxuan, Guan Yongxian, et al. Application of SONIC 2024 Multibeam System to the Terminal Survey [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2016, 25(7): 46–50 (郭军, 刘胜旋, 关永贤, 等. 浅水多波束系统 SONIC 2024 在码头测深中的应用[J]. 测绘工程, 2016, 25(7): 46–50)
- [35] Calder B. Automatic Statistical Processing of Multi-beam Echosounder Data [J]. *International Hydrographic Review*, 2003, 4(1): 53–68

An Automatic Filtering Algorithm of Multi-beam Bathymetry Based on Bidirectional Cloth Simulation

YANG Anxiu^{1,2,3} WU Ziyin³ YANG Fanlin^{1,2} SU Dianpeng^{1,2}
FENG Chengkai¹ XU Fangzheng¹

1 College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2 Key Laboratory of Ocean Geomatics, MNR, Qingdao 266590, China

3 Key Laboratory of Submarine Geoscience, Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China

Abstract: Objectives: To overcome the problem that the current bathymetric filtering methods require manual intervention and are difficult to implement technically, a bidirectional cloth simulation filtering (BCSF) algorithm is proposed and implemented in this paper. Methods: Firstly, the transfer iterative trend

(下转第 542 页)

distribution, location and direction clearly and accurately using the gravity anomalies. Finally, this paper also achieves the results of multi-scale decomposition of the Bouguer gravity anomalies in the Three Gorges region by BEMD algorithm, and estimates the approximate depth of the buried source by the radial logarithmic power spectrum of each BIMF (bi-dimensional intrinsic mode function) and residue, and we deal with each BIMF using WMM method so as to obtain the distribution characteristic of the structure and rock mass in different depths. **Results and Conclusions:** The results of boundary detection at all levels are analyzed and explained according to the regional geology structure feature, the advantage and effectiveness of this method is verified in the end.

Key words: bi-dimensional empirical mode decomposition; wavelet modulus maximum; potential field; multi-scale edge detection

First author: ZHANG Shuangxi, master, specializes in gravity data processing and application. E-mail: shxzhang@cug.edu.cn

Foundation support: Combination Project with Monitoring, Prediction and Scientific Research of Earthquake Technology, CEA(3JH-202001104); the National Natural Science Foundation of China (41704084); the Science for Earthquake Resilience(XH20078Y).

引文格式: ZHANG Shuangxi, LIU Jinzhao, ZHANG Pin, et al. Multi-scale Edge Detection of Potential Field Using the BEMD and WMM Methods[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(4):533-542. DOI:10.13203/j.whugis20200286(张双喜, 刘金钊, 张品, 等. 联合BEMD和WMM方法实现位场多尺度边界检测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(4):533-542. DOI:10.13203/j.whugis20200286)

(上接第 525 页)

surface is established to eliminate the negative anomalies and guarantee the continuous expression of the seafloor topography. Then, the filtering surface is established to solve the over-filtering problem of convex and concave seafloor topographies based on the proposed BCSF correction model. Finally, to further improve the effectiveness of the filtering, adaptive distance threshold is optimized and estimated. To evaluate the performance of the proposed algorithm, the BCSF algorithm is applied to shallow water multibeam bathymetry data. **Results:** The experimental results show that the BCSF algorithm can avoid the over-filtering. The elimination rate of the proposed BCSF algorithm is better than that of the CSF (cloth simulation filtering) algorithm, which decreases from 12.87% to 0.76% for the whole study area and from 15.29% to 1.09% for local study area, respectively. **Conclusions:** Compared with the CUBE (combined uncertainty bathymetry estimation) algorithm, the BCSF algorithm is more easily to implement and can retain more terrain details. Consequently, the BCSF algorithm has strong robustness and application prospects for multibeam bathymetry data.

Key words: multi-beam bathymetry; bidirectional cloth simulation filtering; transfer iterative trend surface; adaptive distance threshold

First author: YANG Anxiu, PhD, majors in seabed topography survey technology and scientific research. E-mail: skyanganxiu@163.com

Corresponding author: WU Ziyin, PhD, professor. E-mail: zyw@vip.163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (52001189, 41830540, 41930535); Open Foundation of Key Laboratory of Submarine Geosciences, MNR (KLSG2106); SDUST Research Fund (2019TDJH103); Scientific Research Fund of the Second Institute of Oceanography, MNR (JZ1902); National Program on Global Change and Air-Sea Interaction Special Project (GASI-EOGE-01).

引文格式: YANG Anxiu, WU Ziyin, YANG Fanlin, et al. An Automatic Filtering Algorithm of Multi-beam Bathymetry Based on Bidirectional Cloth Simulation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(4): 517-525, 542. DOI: 10.13203/j.whugis20190419(杨安秀, 吴自银, 阳凡林, 等. 面向多波束测深数据的双向布料模拟自动滤波算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(4):517-525, 542. DOI:10.13203/j.whugis20190419)